

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533

RELIABILITY OF SHIPS HULLS WITH OVERALL RESIDUAL DEFORMATIONS

S. O. Baryshnikov, T. O. Karklina, V. B. Chistov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Reliability of a vessel hull that has total deflection or kink is discussed in the paper. This hull defect may cause the sudden failure regardless of ship service life. There are no allowable values of characteristics (maximum deflection point) for this defect. There are no statistical data either, indicating the eventual increment of the deflection point, leading to the absence of the possibility to evaluate the hull reliability by this parameter. However, it is known that the presence of this defect causes the emergence of additional bending factor and the change of safety factor coefficient, influencing the allowable values of deck and bottom residual thickness. The residual thickness changes, depending on their operation time, are given in the rules of Russian River Register (RRR) and Russian Maritime Register of Shipping. Besides, these rules contain the allowable values of deck and bottom residual thickness. On the basis of the above, the dependencies for determining the possibility of failures emergence in terms of the average residual thickness of sheets in the link group due to the total deflection of the hull are offered. The condition according to which the average residual thickness of sheets in the links group is less than the allowable value established by the RRR Rules for a ship hull without common deformations is taken for a failure. The dependencies to calculate the decks' or bottoms' working area loss in the presence of deflection/kink given value are suggested. That allows calculating the amendment for permissible value of the average residual thickness of sheets. To evaluate the deformed hull reliability, the method of maximum deflection/kink point determination plays an important role. The complexity of the task consists in the assignment of the residual deflection from the total one. A patent describing the residual deflected hull axis determination method, taking into account its curvature on the separate areas had been obtained by the authors of the paper. Based on this method, the dependencies to determine the maximum residual deflection/kink are offered. Thus, the opportunity to evaluate the reliability of the deformed hull depending on a given number of years of the vessel operation emerges.

Keywords: reliability, allowable wear, residual total deflection/kink, the deviation of the normal to the surface from the vertical, curvature of the plot.

For citation:

Baryshnikov, Sergei O., Tatyana O. Karklina, and Valentin B.Chistov. "Reliability of ships hulls with over all residual deformations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.

УДК 620.165.29:629.5

НАДЕЖНОСТЬ КОРПУСОВ СУДОВ С ОБЩИМИ ОСТАТОЧНЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О.Макарова,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматривается надежность корпуса судна, имеющего общий прогиб или перегиб. Данный дефект корпуса может вызывать появление внезапного отказа независимо от продолжительности эксплуатации судна. Для этого дефекта отсутствуют допускаемые значения его основной характеристики (максимальной стрелки прогиба), а также отсутствуют статистические данные увеличения стрелки прогиба со временем, что исключает возможность оценивать надежность корпуса судна по этому параметру. Вместе с тем известно, что наличие данного дефекта вызывает появление дополнительного изгибающего момента и изменение коэффициента запаса прочности корпуса, оказывающего влияние на допускаемые значения остаточных толщин листов палубы и днища. Изменение остаточных толщин листов в зависимости от времени их эксплуатации известно, так как в Правилах Российского речного регистра и Российского морского регистра судоходства даны сведения о скоростях изнашивания листов палубы и днища.

Кроме того, в указанных Правилах приведены допускаемые значения остаточных толщин листов палубы и днища. На основании изложенного предлагаются зависимости для определения вероятности появления отказов по средней остаточной толщине листов в группе связей вследствие общего прогиба корпуса судна. За отказ принимается условие, в соответствии с которым средняя остаточная толщина листов в группе связей меньше допускаемого значения, установленного Правилами Российского речного регистра для корпуса судна без общих деформаций с учетом изменений, вызванных этими деформациями. Предложены зависимости для расчета потери работоспособной площади палубы или днища при наличии стрелки прогиба / перегиба заданной величины. Это позволит рассчитывать поправку на допускаемое значение средней остаточной толщины листов. Отмечается, что для оценки надежности деформированного корпуса судна важную роль играет способ определения максимальной стрелки прогиба / перегиба. Сложность задачи состоит в выделении остаточного прогиба из общего. Авторами статьи ранее был получен патент на способ определения остаточной изогнутой оси корпуса по кривизне на отдельных его участках. На основании этого способа предлагаются зависимости для определения максимального остаточного прогиба / перегиба, и таким образом, появляется возможность оценки надежности деформированного корпуса в зависимости от заданного числа лет эксплуатации судна.

Ключевые слова: надежность, допускаемый износ, остаточный общий прогиб / перегиб, отклонение нормали к поверхности от вертикали, кривизна участка.

Для цитирования:

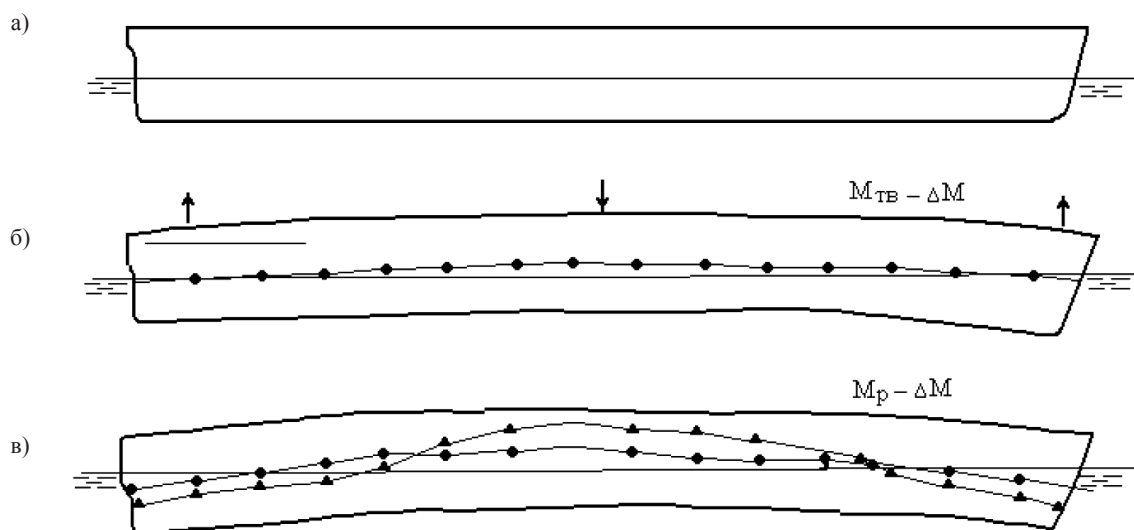
Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.

Введение (Introduction)

Корпуса судов внутреннего и смешанного плавания обычно имеют форму, отличающуюся от проектной. Если палуба растянута, а днище сжато, то имеет место остаточный перегиб, в противном случае — остаточный прогиб. Остаточные общие деформации (перегиб или прогиб) могут появляться в результате действия чрезмерных волновых нагрузок или нагрузок в процессе погрузки-выгрузки. Кроме того, они могут появляться из-за несовершенной технологии при постройке или ремонте судна, при перемещениях на судоподъемном сооружении спуске или подъеме.

Остаточный общий перегиб / прогиб не оказывает влияние на сопротивление воды движению судна, но усложняет судоподъемные работы, увеличивает осадку отдельных частей корпуса, не изменяет местную прочность, но оказывает влияние на общую прочность корпуса.

Появление остаточного общего перегиба (прогиба) приводит к возникновению дополнительного изгибающего момента, который может как уменьшать, так и увеличивать расчетный изгибающий момент [1]. Влияние общих деформаций на расчетный изгибающий момент показано на рис. 1.



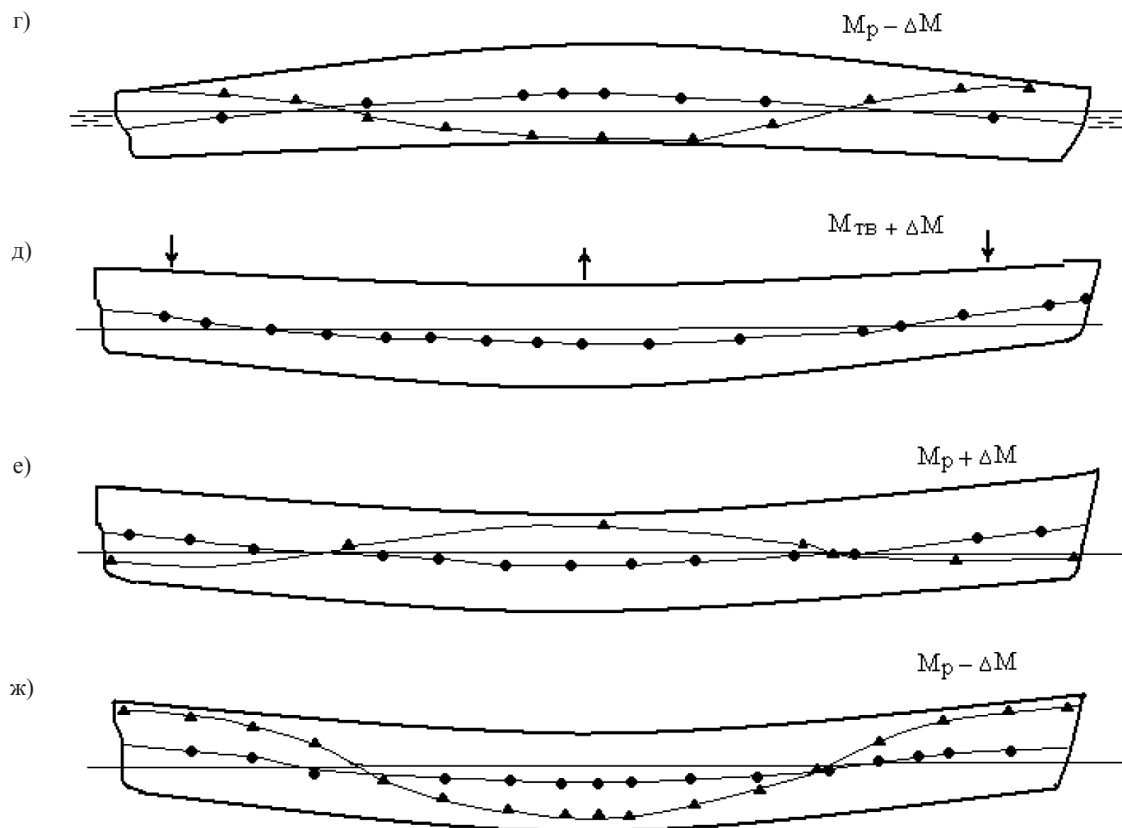


Рис. 1. Влияние общих остаточных деформаций на расчетный изгибающий момент:

- a* — корпус без деформаций, судно на тихой воде; *б* — корпус имеет перегиб, судно на тихой воде;
в — корпус имеет перегиб, судно на вершине волны; *г* — корпус имеет перегиб, судно на подошве волны;
д — корпус имеет прогиб, судно на тихой воде; *е* — корпус имеет прогиб, судно на вершине волны;
ж — корпус имеет прогиб, судно на подошве волны

Условные обозначения:

●-----●-----● — изогнутая ось корпуса; ▲-----▲-----▲ — профиль волны

Методы и материалы (Methods and Materials)

Влияние изменения формы корпуса в процессе эксплуатации на обеспеченность его общей прочности из-за появления дополнительного изгибающего момента известно и отражено в учебниках и учебных пособиях [1], [2]. Однако в Правилах Российского речного регистра (далее — Правила РРР) остаточный общий перегиб / прогиб никак не оценивался, если отсутствовали признаки наметившегося перелома. Такое положение в Правилах РРР объяснялось двумя причинами: во-первых, сложностью определения остаточного общего перегиба / прогиба, который мог быть получен как разность между измеренным и упругим, рассчитанным по правилам строительной механики корабля для балки переменного сечения с неравномерной по длине нагрузкой; во-вторых, дополнительный изгибающий момент мог уменьшать расчетный момент и, следовательно, положительно влиять на обеспеченность общей прочности.

В начале 2000-х гг. профессором Г. В. Бойцовым была показана необходимость учета общего перегиба и предложено в связи с этим создать норматив для такого дефекта. Включение такого норматива в Правила РРР потребовало бы измерения дефекта при каждой дефектации и создания технологии ремонта корпуса в случае, если дефект превзойдет допускаемые значения. Так как получение общего перегиба / прогиба в большинстве случаев не исключает возможности дальнейшей эксплуатации судна (хотя оказывает влияние на обеспеченность общей прочности корпуса), было предложено не назначать нормативов, ограничивающих общий прогиб или перегиб, а дать указание каким образом следует учитывать общие остаточные деформации в расчетах общей прочности и определять минимальное значение этих деформаций, превышение которых требует учета

их в расчетах общей прочности. Одновременно было предложено нашему вузу принять участие в работе и создать технологические процессы измерения и устранения остаточного перегиба [9].

Практика эксплуатации судов внутреннего и смешанного плавания показывает, что корпуса крупных грузовых судов и барж имеют, как правило, перегиб, а стрелка остаточного перегиба может достигать 800 мм и более. Статистические данные о результатах измерений остаточного перегиба судов можно найти в работах [3]–[5].

Выражение для дополнительного изгибающего момента ΔM от общего остаточного прогиба / перегиба определим по формуле [1]:

$$\Delta M = \pm \beta k_{\alpha} B L^2 f_0, \quad (1)$$

где β — коэффициент, учитывающий гибкость корпуса, близкий к 1,0 ($\beta \leq 1$);

B, L — ширина и длина корпуса, соответственно, м;

f_0 — максимальная стрелка прогиба / перегиба, м;

k_{α} — коэффициент, зависящий от коэффициента полноты ватерлинии α (изменяется в пределах $k_{\alpha} = 0,05$ – $0,20$ и может определяться по графику на рис. 2 или по формуле (2)):

$$k_{\alpha} = \frac{n(n^3 + 5n + 10)}{48(n+2)(n+3)(n+4)}, \quad (2)$$

где $n = \alpha / (1 - \alpha)$ — показатель степени в выражении для изменения ширины корпуса по его длине на заданной ватерлинии.

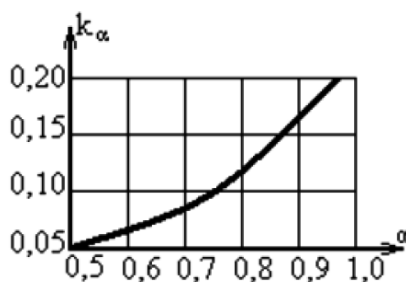


Рис. 2. График для расчета коэффициента k_{α}

Профессором Г. В. Бойцовым [6] было предложено учитывать влияние остаточных деформаций корпуса на общую прочность при величине остаточной стрелки прогиба / перегиба превышающей нормативное значение:

$$f_{0н} = L(R_{\sigma} / E)(L / 15H), \quad (3)$$

где R_{σ} — предел текучести материала крайней связи, МПа;

E — модуль нормальной упругости стали, МПа;

H — высота борта корпуса на миделе, м.

Возникновение остаточного прогиба / перегиба сопровождается появлением в крайних связях корпуса остаточных напряжений, поэтому в источнике [6] при выполнении расчетов общей прочности корпусов, имеющих стрелку остаточных деформаций $f_{0н}$, нормативный коэффициент запаса прочности корпуса должен увеличиваться пропорционально коэффициенту

$$k_f = 1 + 0,1[(f_0 / f_{0н}) - 1] \geq 1. \quad (4)$$

При годном техническом состоянии корпуса, согласно Правилам РРР, должно выполняться условие общей прочности:

$$M_{\text{пр.экспл}} \geq K_{\text{годн}} \cdot M_{\text{р}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{пр.экспл}}$ — предельный момент корпуса судна в эксплуатации, определенный с учетом износов и местных остаточных деформаций для прогиба и перегиба по абсолютной величине, кН·м;

M_p — расчетный изгибающий момент при прогибе и перегибе, взятый по модулю, кН·м;

$K_{\text{годн}}$ — коэффициент запаса прочности.

Нормативные значения коэффициента запаса прочности приведены в таблице из правил технического надзора за судами в период эксплуатации в зависимости от класса судна.

Нормативные значения коэффициента запаса прочности

Класс судна	$K_{\text{годн}}$
«Л», «Р», «О», «М»	1,15
«О-ПР»	1,19
«М-ПР»	1,26
«М-СП»	1,27

Предельный момент корпуса судна в эксплуатации вычисляется по формуле

$$M_{\text{пр.экспл}} = 10^3 \cdot W_{\text{пр.экспл}} \cdot \sigma_{\text{оп}}, \quad (6)$$

где $W_{\text{пр.экспл}}$ — момент сопротивления рассматриваемого сечения корпуса, определенный с учетом имеющихся в связях в данный момент времени остаточных толщин и параметров деформаций в этом сечении исходя из предположения, что в одной из точек сечения напряжения равны опасным напряжениям относительно этой связи, м³;

$\sigma_{\text{оп}}$ — опасное напряжение в крайней связи, МПа;

Опасное напряжение в крайней связи принимается:

– для связей, не несущих местной нагрузки:

$$\sigma_{\text{оп}} = k_n R_{\text{ен}}, \quad (7)$$

– для связей, несущих местную нагрузку:

$$\sigma_{\text{оп}} = 0,9 k_n R_{\text{ен}}, \quad (8)$$

$$\text{где } k_n = 1 - 0,089((R_{\text{ен}} / 235) - 1) - 0,129((R_{\text{ен}} / 235) - 1)^2. \quad (9)$$

Условие (5) для судна с общим остаточным перегибом или прогибом примет вид

$$M_{\text{пр.экспл}}^* \geq K_{\text{годн}} k_f (M_p + \Delta M), \quad (10)$$

где $M_{\text{пр.экспл}}^*$ — предельный момент корпуса судна, имеющего общий остаточный перегиб / прогиб.

Предельный момент корпуса судна, имеющего общий перегиб или прогиб будет определяться по формуле

$$M_{\text{пр.экспл}}^* = 10^3 (W_{\text{пр.экспл}} + \Delta W_{\text{пр.экспл}}) \sigma_{\text{оп}}. \quad (11)$$

где $\Delta W_{\text{пр.экспл}}$ — необходимое увеличение момента сопротивления корпуса для обеспечения общей предельной прочности, м³.

С учетом выражения (11) зависимость (10) можно представить в виде

$$10^3 W_{\text{пр.экспл}} \sigma_{\text{оп}} \left(1 + \frac{\Delta W_{\text{пр.экспл}}}{W_{\text{пр.экспл}}}\right) \geq K_{\text{г}} \cdot k_f \cdot M_p \cdot \left(1 + \frac{\Delta M}{M_p}\right). \quad (12)$$

Подставив значения из (5) и сократив, получим

$$1 + \frac{\Delta W_{\text{пр}}}{W_{\text{пр}}} \geq k_f \left(1 + \frac{\Delta M}{M_p}\right). \quad (13)$$

В источнике [1] показано, например, что

$$\frac{\Delta W_{\text{пр}}}{W_{\text{пр}}} \approx \frac{\Delta F}{F}, \quad (14)$$

где ΔF — изменение площади крайней связи, относительно которой имеет место предельный момент сопротивления;

F — площадь этой крайней связи.

Тогда из выражения (13) после подстановки (14) и преобразований получим

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta M}{M_p} \left(0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{0н}} \right). \quad (15)$$

На рис. 3 показаны графики изменения относительного уменьшения работоспособной площади лимитирующей крайней связи корпуса в зависимости от отношения стрелки перегиба корпуса к нормативному ее значению по формуле (3). Это отношение не может быть меньше единицы, так как предложено учитывать перегиб в расчетах прочности, только в том случае, когда он превышает нормативные значения лимитирующей крайней связи. Полученная зависимость (15) оказывает влияние на надежность корпуса только для участка группы связей палубы или днища.

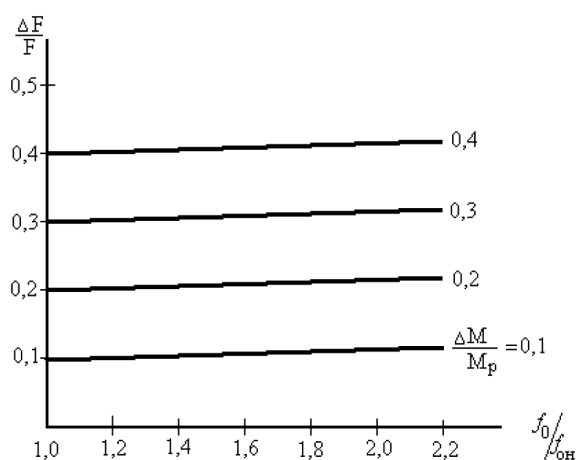


Рис. 3. Уменьшение работоспособной площади, лимитирующей крайней связи

Можно принять, что в каждом отдельном сечении (участке палубы или днища между бортами равном длине листа) скорости изнашивания листов настила или обшивки одинаковы и вероятность их появления (скоростей изнашивания) s_i подчиняется нормальному закону с характеристиками $\bar{s}$ (средняя скорость изнашивания) и σ_s (стандарт скоростей изнашивания), заданными Правилами РРР или РМРС. В этом случае для палубы или днища судов внутреннего и смешанного плавания отказом будет условие, что средняя остаточная толщина в сечении $\bar{t}_{ост}$ меньше допустимой:

$$\frac{\sum t_{остi} b_i}{\sum b_i} < K \frac{\sum t_{приi} b_i}{\sum b_i} = [t_{сеч}], \quad (16)$$

где $t_{остi}$ — остаточная толщина i -го листа в сечении во время дефектации;

$t_{приi}$ — проектная толщина i -го листа в сечении;

b_i — ширина i -го листа в сечении;

K — коэффициент допускаемого сохранения средней проектной толщины для заданной группы связей по Правилам (РРР).

Если корпус судна имеет общие остаточные деформации, то допустимая средняя остаточная толщина лимитирующей группы связей должна быть увеличена [15] и выражение (16) с учетом (15) примет вид

$$\frac{\sum_1^n t_{остi} b_i}{\sum_1^n b_i} < K \frac{\sum_1^n t_{приi} b_i}{\sum_1^n b_i} + \frac{\Delta F}{\sum_1^n b_i}. \quad (17)$$

Преобразовав выражение (17), получим значение допускаемого износа средней толщины крайней связи:

$$[\Delta t_{\text{сеч}}] = \frac{\sum_1^n (1-K) t_{\text{при}} b_i}{\sum_1^n b_i} - \frac{\Delta F}{\sum_1^n b_i}. \quad (18)$$

С учетом выражений (1), (3) и (15) получим

$$[\Delta t_{\text{сеч}}] = [\Delta t_{\text{сеч}}^0] - A \frac{f_0}{f_{0н}} \left(0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{0н}} \right), \quad (19)$$

где $[\Delta t_{\text{сеч}}^0] = (1-K) \frac{\sum_1^n t_{\text{при}} b_i}{\sum_1^n b_i}$ — допускаемый средний износ в сечении корпуса без общих остаточных деформаций;

$$A = \frac{\Delta M}{M_p \sum_1^n b_i} \text{ — коэффициент для поправки к допускаемому износу из-за общих остаточных деформаций;}$$

ΔM_n — дополнительный изгибающий момент по формуле (1) при максимальном прогибе / перегибе, равном нормативному, согласно выражению (3).

Уменьшение средней остаточной толщины сечения впоследствии из-за износа через τ лет эксплуатации судна (год, для которого считается вероятность появления износа заданной величины) будет

$$\Delta t_{\text{сеч}} = \frac{\sum_1^n \tau_i c_i b_i}{\sum_1^n b_i}, \quad (20)$$

где n — количество листов в сечении группы связей;

τ_i — год службы элемента (листа) в сечении (наработка до настоящей дефектации).

Ранее было принято, что скорость изнашивания листов в сечении одинакова: $c_i = c_j$. Тогда выражение (20) примет вид:

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_i b_i}{\sum_1^n b_i}. \quad (21)$$

Если учесть, что период между очередными освидетельствованиями, а следовательно, между ремонтами, при которых листы в сечении могут быть заменены, составляет пять лет, то зависимость (21) можно представить в виде

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_i b_i}{\sum_1^n b_i} - c_j \frac{\sum_1^n (\tau_i - n'_i \cdot 5) b_i}{\sum_1^n b_i}, \quad (22)$$

где n_1 — количество замененных листов в сечении за τ_j лет эксплуатации;

n' — количество межремонтных периодов, которое отслужил лист до τ_j года службы судна.

Величина в скобках в выражении (22) не может быть отрицательна, а τ_j постоянна. Тогда после преобразования получим

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_j b_i}{\sum_1^n b_i} \left(1 - \frac{\sum_1^n b_i}{\sum_1^n b_i} + 5 \frac{\sum_1^n n'_i b_i}{\sum_1^n \tau_j b_i} \right). \quad (23)$$

Выражение (23) можно еще упростить, если принять ширину листов во всем сечении одинаковой ($b_i = \text{const}$). Тогда

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_j b_i}{\sum_1^n b_i} \left(1 - \frac{n_i}{n} + 5 \frac{\sum_1^n n'_i}{n_i \tau_j} \right) \quad (24)$$

или

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \tau_j A_1, \quad (25)$$

где $A_1 = \left(1 - \frac{n_i}{n} + 5 \frac{\sum_1^n n'_i}{n_i \tau_j} \right)$ — коэффициент среднего износа листов в сечении, учитывающий количество замененных листов и время их установки.

Вероятность уменьшения средней остаточной толщины из-за износа можно оценить интегралом вероятности по формуле

$$P(\Delta t_{\text{сеч}}) = \frac{1}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{\Delta t_{\text{сеч}} - \bar{\Delta t}_{\text{сеч}}}{\sigma_n} \right) \right), \quad (26)$$

где $\bar{\Delta t}_{\text{сеч}} = \bar{c}_j \tau_j A_1$ — математическое ожидание уменьшения средней остаточной толщины в группе связей;

$\sigma_n = \tau \sigma_c$ — среднеквадратическое отклонение уменьшения средней остаточной толщины (стандарт износа).

После преобразования получим

$$P(\Delta t_{\text{сеч}}) = \frac{1}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{\Delta t_{\text{сеч}}}{\tau \sigma_c} - \frac{1}{\nu} \right) \right), \quad (27)$$

где $\nu = \frac{\tau \sigma_c}{\bar{c}} = \frac{\sigma_c}{\bar{c}}$ — коэффициент вариации скоростей изнашивания, дан в Правилах РРР (получен в источнике [7]).

Используя зависимость (27), можно построить графики плотности вероятностей уменьшения средней остаточной толщины для днища или палубы в средней части и рассчитать вероятность безотказной работы после заданного числа лет эксплуатации [7] с учетом имеющихся общих остаточных деформаций. На рис. 4 показана номограмма для оценки надежности группы связей (обшивка днища) в сечении из одиннадцати листов корпуса судна класса М-СП после 30 лет эксплуатации.

Если в средней части корпуса в крайней группе связей имеет место n_1 сечений (участков корпуса, равных длине листа), то вероятность безотказной работы корпуса на этих участках группы связей будет

$$P_j(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}]) = \Pi_1^n P_j(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}]), \quad (28)$$

где $[\Delta t_{\text{сеч}}]$ — допускаемый износ группы связей по (19);

$P_j(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}])$ — вероятность появления отказа в сечении.

Анализируя полученные зависимости и номограммы на рис. 4, видно, что для оценки надежности корпуса необходимо знать максимальную стрелку общей остаточной деформации корпуса [16], нахождение которой осложняется необходимостью исключить упругую составляющую. Авторами статьи был предложен и запатентован способ определения остаточной изогнутой оси корпуса по измеренной остаточной кривизне на отдельных участках [7]:

$$y_{\text{ост}}(x) = \frac{\sum_1^n c_i^{\text{ост}} (L - L_i)}{L} x - \sum \left(\frac{c_i^{\text{ост}} (x - (L_i - \frac{l}{2}))^2}{2} \Big|_{|x| \geq (L_i - \frac{l}{2})} - \frac{c_i^{\text{ост}} (x - (L_i + \frac{l}{2}))^2}{2} \Big|_{|x| \geq (L_i + \frac{l}{2})} \right), \quad (29)$$

где $y_{\text{ост}}^{(X)}$ — стрелка прогиба остаточной изогнутой оси корпуса на расстоянии X от кормового перпендикуляра;

$c_i^{\text{ост}}$ — остаточная кривизна на i -м участке корпуса;

l — длина участка, на котором измеряется кривизна (принимается кратной рамным шпациям и составляет 6–10 м);

L — длина корпуса судна между перпендикулярами;

L_i — расстояние от кормового перпендикуляра до середины i -го участка, на котором измерена кривизна:

$x \geq L_i - \frac{l}{2}$ и $x \geq L_i + \frac{l}{2}$ — показатели, указывающие на то, что слагаемые учитываются только в том случае, когда выражение в скобках, возводимое в квадрат, имеет положительное значение.

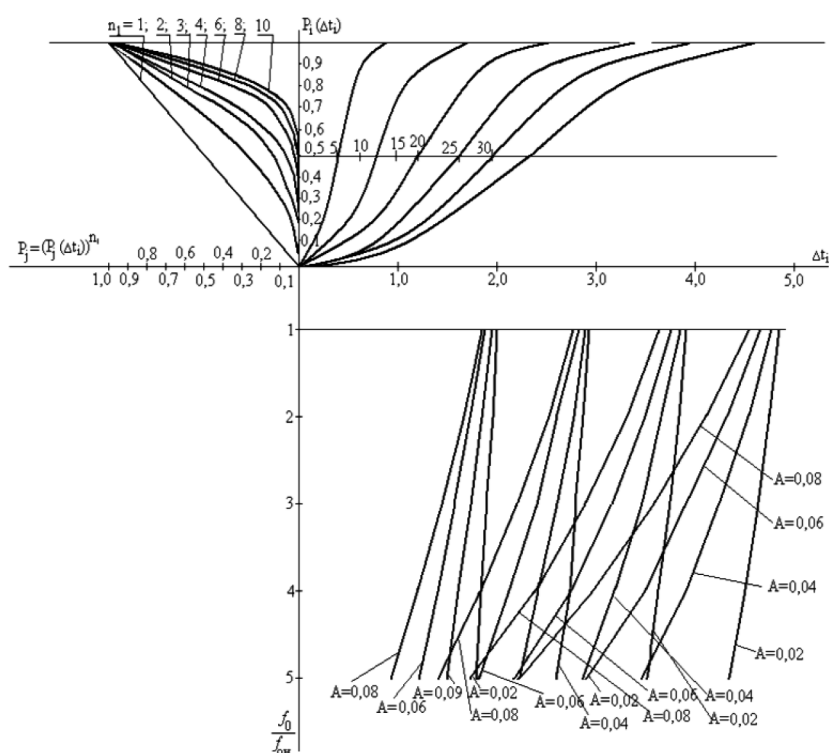


Рис. 4. Номограмма для оценки надежности деформированного корпуса судна

Формула (29) получена из рассмотрения дифференциальных зависимостей при изгибе балки, на которых основан графоаналитический способ определения перемещений. В этом случае прогиб в любой точке равен изгибающему моменту в сечении фиктивной балки под действием распределенной нагрузки, равной кривизне на отдельных участках.

Остаточную кривизну на отдельных участках корпуса судна можно определить по изменению отклонения нормали к поверхности от вертикали в начале и в конце участка как это показано на рис. 5. Кривизна на участке в данном случае будет определяться по формуле

$$C_{\text{изм}} = \frac{1}{\rho} = \frac{\Delta\varphi}{l}. \quad (30)$$

Кривизна, вычисленная по формуле (30), будет включать в себя упругую составляющую, что, естественно, внесет погрешность в определение максимальной стрелки прогиба деформированного корпуса.

Если кривизна на участке меньше упругой, определяемой по формуле (31), то для определения остаточной стрелки прогиба она не должна учитываться. Этот участок следует считать прямолинейным:

$$c_y = \frac{1}{\rho} = \frac{10^3 M_{np}}{E J_{HO}}, \quad (31)$$

где c_y — максимальная кривизна, исчезающая после снятия нагрузки от сил веса и сил поддержания корпуса;

$M_{np} = \sigma_t \cdot W_{np}$ — предельный изгибающий момент, кН·м;

σ_t — предел текучести материала крайней связи, МПа;

$W_{np} = \frac{J_{HO}}{H - y_{HO}}$ — момент сопротивления относительно крайней связи, где напряжения достигли

предела текучести материала;

J_{HO} — момент инерции площади поперечного сечения корпуса относительно нейтральной оси на рассмотренном участке, м⁴;

E — модуль нормальной упругости, МПа;

H — высота борта, м.

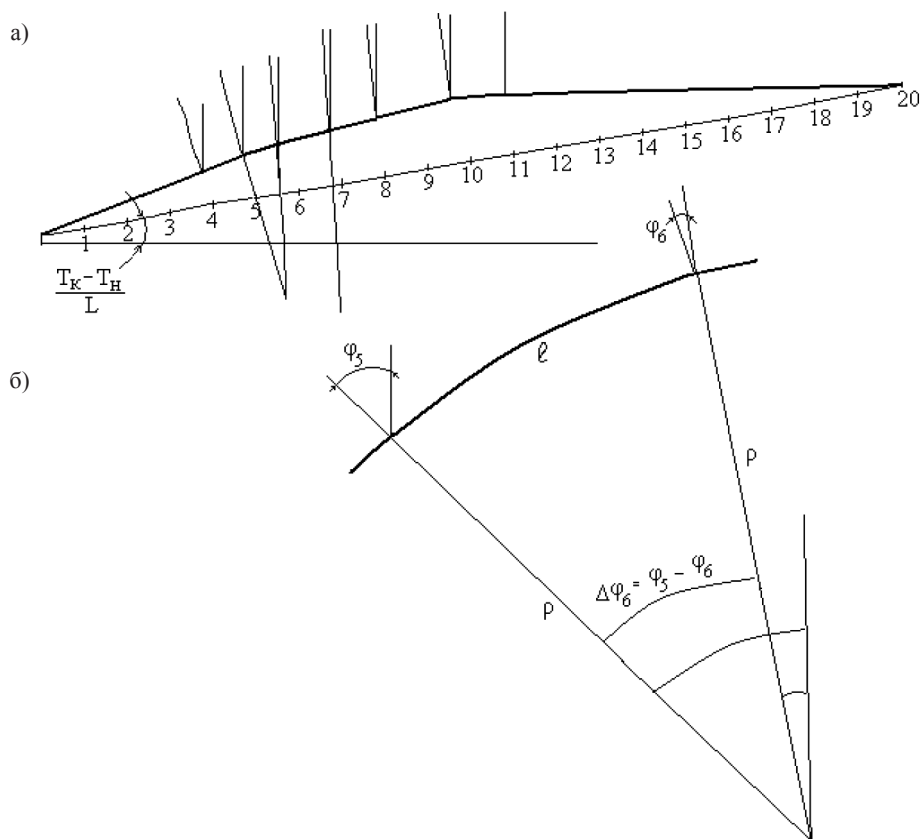


Рис. 5. Измерение кривизны на отдельных участках:
а — ось деформированного корпуса; б — определение кривизны на участке б

С учетом принятых обозначений после преобразований получим

$$c_y = \frac{1}{\rho} = \frac{\sigma_t}{E} \cdot \frac{1}{(H - y_{HO})}. \quad (32)$$

Тогда, используя формулу (31), установим минимальное изменение угла на участке, которое следует учитывать при определении остаточного перегиба корпуса:

$$\Delta\varphi \geq \frac{\sigma_t}{E} \cdot \frac{1}{(H - y_{HO})}. \quad (33)$$

После подстановки реальных значений для материала корпуса и геометрических размеров поперечного сечения корпуса грузового судна внутреннего или смешанного плавания получим,

что изменение угла на заданном участке следует учитывать с точностью 0,1 град. Остаточная кривизна — равномерно распределенная нагрузка на участок фиктивной балки — запишется в виде

$$c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}} - K'_i, \quad (34)$$

где $K'_i = c_y \frac{M_{(x)}}{M_{\text{пр}}}$ — уменьшение кривизны на участке из-за упругой составляющей.

На рис. 6 показан способ вычисления прогибов на участках корпуса (определение остаточной изогнутой оси). Сечение корпуса, в котором стрелка прогиба будет максимальной, определится из условия

$$\sum_1^n c_i^{\text{ост}} \cdot l \frac{L - L_i}{L} - \sum_1^n c_i^{\text{ост}} \cdot l = 0, \quad (35)$$

где L — длина корпуса, м;

$L_i = L_k + il$ — расстояние от кормового перпендикуляра до места измерения угла;

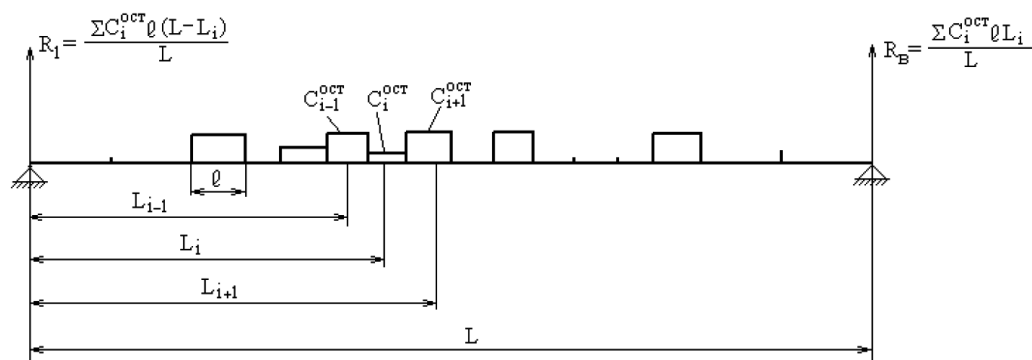
l — длина участка, на котором определяется отклонения нормали от вертикали, м;

$n = \frac{L - L_k - L_n}{l}$ — количество участков, на которых выполняется измерение отклонения нормали от вертикали;

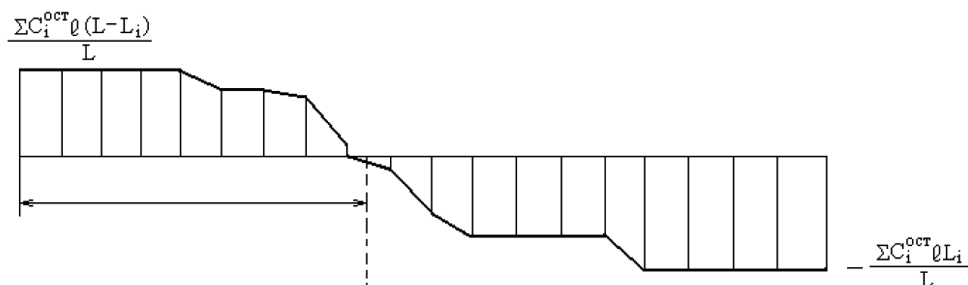
L_k и L_n — соответственно длина кормового и носового участка, на которых отсутствуют деформации, м;

n_1 — количество последовательно расположенных участков, с учетом которых выполняется условие (32).

а)



б)



в)

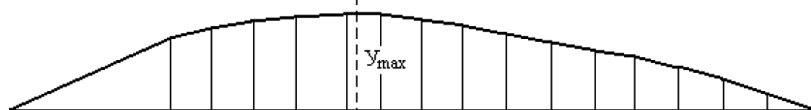


Рис. 6. Определение прогибов на участках корпуса
а — фиктивная балка; б — эпюра изменения углов поворота;
в — эпюра прогибов (изогнутая ось)

Расстояние от кормового перпендикуляра до сечения с максимальным прогибом / перегибом:

$$L_{\max} = L_k + n_1 l. \quad (36)$$

Условие (32) можно преобразовать, получив зависимость для нахождения n_1 :

$$\sum_1^{n_1} \Delta \varphi_i = \sum_1^n \Delta \varphi_i - \sum_1^n \Delta \varphi_i \frac{l_i}{L}. \quad (37)$$

После подстановки значения расстояния для максимального прогиба ($L_{\max}$) в выражение (29) получим значение максимального прогиба:

$$f_0 = \frac{\sum_1^n c_i^{\text{ост}} (L - l_i)}{L} \times \\ \times L_{\max} \cdot \sum \left[\frac{c_i^{\text{ост}} \left(L_{\max} - \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{L_{\max} \geq \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right)} - \frac{c_i^{\text{ост}} \left(L_{\max} - \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{L_{\max} \geq \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right)} \right]. \quad (38)$$

Чтобы исключить упругую составляющую не только на ранее выделенных прямолинейных участках, следует уменьшить кривизну корпуса также на изогнутых участках, приняв

$$c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}} - c_{\text{упр}}, \quad (39)$$

где $c_i^{\text{изм}}$ — кривизна на участке, вычисленная по результатам измерения изменения угла отклонения нормали к поверхности от вертикали;

$c_{\text{упр}} = \frac{10^3 M_i^{\text{т.б}}}{E J_{\text{НО}}}$ — уменьшение кривизны в i -м сечении при разгрузке;

$M_i^{\text{т.б}}$ — изгибающий момент в i -м сечении от нагрузки во время измерения углов в кН·м;

E — модуль нормальной упругости стали, $2 \cdot 10^5$ МПа;

$J_{\text{НО}}$ — момент инерции поперечного сечения корпуса в средней части с учетом износов.

Необходимо учесть, что упругая составляющая измеряемой кривизны существенно меньше, чем максимальная упругая по формуле (29):

$$c_{\text{упр}} = \frac{10^3 M_i^{\text{т.б}}}{E J_{\text{НО}}} \frac{\sigma_{\text{т}}}{E} \cdot \frac{1}{H - y_{\text{НО}}}. \quad (40)$$

С небольшой ошибкой в безопасную сторону, получая несколько большее значение остаточной стрелки прогиба / перегиба, можно пренебречь упругой составляющей в кривизне деформированного участка и определять стрелку прогиба / перегиба f_0 по формуле (26), принимая $c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}}$. Таким образом, получены все необходимые зависимости для оценки надежности деформированных корпусов судов.

Результаты исследования (Research Result)

Получены зависимости, позволяющие оценивать надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями [14] после заданного числа лет эксплуатации с учетом выполненных ранее ремонтов и уточненных нормативов износов.

Допустимый износ палубы или днища определяется по формуле (19):

$$[\Delta t_{\text{сеч}}] = [\Delta t_{\text{сеч}}^0] - A \frac{f_0}{f_{0\text{н}}} \left(0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{0\text{н}}} \right),$$

где $[\Delta t_{\text{сеч}}^0] = (1 - K)$ — допускаемый средний износ в сечении корпуса без общих остаточных деформаций;

A — коэффициент для поправки к допускаемому износу из-за общих остаточных деформаций;

$\Delta M_{\text{н}}$ — дополнительный изгибающий момент по формуле (1) при максимальном прогибе / перегибе, равном нормативному по формуле (3);

$F_{0н}$ — нормативное значение прогиба / перегиба, превышение которого требует учета его в расчетах общей прочности корпуса;

f_0 — значение остаточного прогиба / перегиба корпуса.

Остаточный общий прогиб / перегиб по результатам измерений вычисляется по формуле

$$f_0 = \sum_1^n c_i^{\text{ост}} (L - L_i) \cdot (L_{\text{max}} / l) - 0,5 \sum c_i^{\text{ост}} (L_{\text{max}} - (L_i - 0,5l))^2_{|L_{\text{max}} \geq (L_i - 0,5l)} - c_i^{\text{ост}} (L_{\text{max}} - (L_i + 0,5l))^2_{|L_{\text{max}} \geq (L_i + 0,5l)}.$$

Вероятность появления отказа в сечениях палубы или днища после τ_j лет эксплуатации определяется в виде

$$P_j(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}]) = \prod_1^n P_i(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}]),$$

где $\Delta t_{\text{сеч}}$ — средний износ в сечении;

$[\Delta t_{\text{сеч}}]$ — допускаемый средний износ в сечении;

n_1 — количество сечений палубы или днища (участков равных длине листа), в которых оценивается вероятность появления отказа;

$P_i(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}])$ — вероятность появления отказа в сечении.

Использование полученных зависимостей позволяет прогнозировать надежность корпусов после заданного числа лет эксплуатации, обосновывать объем и способы ремонта корпуса, устанавливать срок службы элементов и корпуса судна в целом.

Заключение (Conclusion)

Остаточный общий прогиб / перегиб оказывает влияние на общий прочность корпуса, чем снижает характеристики его надежности. Данный дефект не вызывает появление внезапного отказа. Снижение надежности происходит за счет уменьшения допускаемого значения средней остаточной толщины палубы и днища, которая уменьшается пропорционально известным скоростям изнашивания, распределенным по нормальному закону. Получены зависимости, позволяющие рассчитывать показатели надежности, деформированного корпуса судна после заданного числа лет эксплуатации и вычислять его остаточную стрелку прогиба по измеренной кривизне на отдельных участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистов В. Б. Технология ремонта корпусов судов: конспект лекций / В. Б. Чистов. — Л.: ЛИВТ, 1978. — 78 с.
2. Лопырев Н. К. Технология судоремонта / Н. К. Лопырев, П. П. Немков, Ю. В. Сумеркин. — М.: Транспорт, 1981. — 285 с.
3. Карклина Т. О. Технологические методы стабилизации метрологических характеристик танкеров: дис. ... канд. техн. наук / Татьяна Осиповна Карклина. — Л.: СПбГУВК, 1991. — 155 с.
4. Анализ возможных причин появления общих остаточных деформаций корпуса: отчет по договору № ЦПР-05-31-07; рук. д-р техн. наук, проф. Г. В. Бойцов. — СПб., 2005. — 48 с.
5. Нормирование остаточных перегибов корпусов судов. Обоснование ограничений, вводимых Речным регистром на величину максимальных остаточных деформаций общего перегиба корпусов судов: отчет по договору № 143/17/31/09/1701/ ВГУВТ; рук. канд. техн. наук, проф. С. Н. Гиринов. — Новгород, 2018. — 79 с.
6. Разработка предложений и расчетных зависимостей для учета остаточных прогибов (перегибов) при расчетах общей прочности, а также мероприятий, ограничивающих их появление: отчет по договору № ЦПР-05-31-07(этап 2); рук. д-р техн. наук, проф. Г. В. Бойцов. — СПб., 2005. — 56 с.
7. Анализ нормативов скоростей изнашивания связей и остаточных деформаций. Корректировка правил РРР: отчет по договору № ЦПР-04-33-09; рук. Ю. И. Ефименков. — СПб., 2005. — 85 с.
8. Пат. 2435149 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ определения остаточного продольного изгиба корпуса судна / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов; заяв. и патентообл. СПбГУВК. — № 2010106960/28; заявл. 24.02.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33.

9. Технологическая инструкция по устранению остаточного перегиба корпусов судов / ФГОУ ВПО Санкт-Петербургский Государственный университет водных коммуникаций; рук. С. О. Барышников, отв. исп.: Т. О. Карклина, В. Б. Чистов. Согласов. ФГУ Российский речной регистр. Письмо 07-06-450 от 21.02.2012. — СПб., 2011. — 201 с.
10. Chistov V. B. Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls / V. B. Chistov, S. O. Baryshnicov, N. I. Gerasimov, V. A. Zhukov // 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). — IEEE, 2018. — Pp. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937.
11. Барышников С. О. Надежность механизмов корпусов судов: монография / С. О. Барышников, Л. И. Погадаев, В. Б. Чистов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 251 с.
12. Гирин С. Н. Общие принципы учета эксплуатационных ограничений при нормировании мореходных характеристик судов прибрежного плавания / С. Н. Гирин, И. А. Гуляев, Ю. И. Ефименков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 57. — С.18–26.
13. Карклина Т. О. Замена сливных каналов теплохода «Невский» на плаву / Т. О. Карклина, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 23–31.
14. Ефименков Ю. И. Основные результаты разработки требований к судам ограниченного района плавания R2-RSN(4,5) / Ю. И. Ефименков [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2013. — № 36. — С.41–43.
15. Ефименков Ю. И. Устранение остаточного перегиба корпуса теплохода «Волго-Дон 225» / Ю. И. Ефименков, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Сборник научных трудов ЦНИИМФ. — 2015. — № 1. — С. 117–125.

REFERENCES

1. Chistov, V. B. *Tekhnologiya remonta korpusov sudov. Konspektleksii*. L.: LIVT, 1978.
2. Lopyrev, N. K., P. P. Nemkov, and Yu.V. Sumerkin. *Tekhnologiya sudoremonta*. M.: Transport, 1981.
3. Karklina, T. O. *Tekhnologicheskie metody stabilizatsii metrologicheskikh kharakteristik tankerov*. PhD diss. L.: SPGUVK, 1991.
4. *Analiz vozmozhnykh prichin poyavleniya obshchikh ostatochnykh deformatsii korpusa*. Otchet po dogovoru № TsPR-05-31-07. Rukovoditel' d.t.n., prof. G. V. Boitsov. Sankt-Peterburg, 2005.
5. *Normirovanie ostatochnykh peregibov korpusov sudov. Obosnovanie ograniichenii, vvodimyykh Rechnym Registrom na velichinu maksimal'nykh ostatochnykh deformatsii obshchego peregiba korpusov sudov*. Otchet po dogovoru № 143/17/31/09/1701/. Novgorod, 2018.
6. *Razrabotka predlozhenii i raschetnykh zavisimostei dlya ucheta ostatochnykh progibov (peregibov) pri raschetakh obshchei prochnosti, a takzhe meropriyatii, ograniчивayushchikh ikh poyavlenie*. Otchet po dogovoru № TsRP-05-31-07(etap 2). Rukovoditel' d.t.n., prof. G.V. Boitsov. Sankt-Peterburg, 2005.
7. *Analiz normativov skorostei iznashivaniya svyazei i ostatochnykh deformatsii. Korrektirovka pravil RRR*. Otchet po dogovoru № TsRP-04-33-09. SPb., 2005.
8. Baryshnikov, S. O., T. O. Karklina, and V. B. Chistov. RU 2 435 149 C1, IPC G 01 M 5/00. Sposob opredeleniya ostatochnogo prodol'nogo izgiba korpusa sudna. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Nov. 2011.
9. *Tekhnologicheskaya instruksiya po ustraneniю u ostatochnogo peregiba korpusov sudov*. SPb., 2011.
10. Chistov, Valentin B., Sergey O. Baryshnicov, Nikolay I. Gerasimov, and Vladimir A. Zhukov. "Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls." 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»(IT&QM&IS). IEEE, 2018. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937
11. Baryshnikov, S. O., L. I. Pogadaev, and V. B. Chistov. *Nadezhnost' mekhanizmov korpusov sudov. Monografiya*. SPb.: Izdatel'stvo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2018.
12. Girin, S. N., I. A. Gulyaev, and Yu.I. Efimenkov. "General principles of accounting operational limitations for justification of a navigation characteristics of coastal ships." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 57 (2018): 18–26.
13. Karklina, Tatyana Osipovna, Anatoliy Vladimirovich Pavlov, and Valentin Borisovich Chistov. "Replacement of drain passages of motorship "Nevskiy" afloat." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 23–31.

14. Efimenkov, Yu. I., M. A. Kuteinikov, G. V. Markozov, and S. A. Sotekov. "Osnovnye rezul'taty razrabotki trebovaniy k sudam ogranichenogo raiona plavaniya R2-RSN(4,5)." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo Morskogo registra sudokhodstva* 36 (2013): 41–43.

15. Efimenkov, Yu.I., A.V. Pavlov, and V.B. Chistov. "Ustranenie ostatocnogo peregiba korpusa teplokhoda «Volgo-Don 225»." *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIMF* 1 (2015): 117–125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —

доктор технических наук, профессор, ректор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: rector@gumrf.ru

Карклина Татьяна Осиповна —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: karklinato@gumrf.ru

Чистов Валентин Борисович —

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: chistovvb@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergei O. —

Dr. of Technical Sciences, professor, rector

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: rector@gumrf.ru

Karklina, Tatyana O. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: karklinato@gumrf.ru

Chistov, Valentin B. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: chistovvb@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2018 г.

Received: December 24, 2018.